

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт
з курсу «Технологія турбінобудування»
для студентів спеціальності
142 «Енергетичне машинобудування»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 19.02.2020 р.

Харків
НТУ „ХПІ”
2020

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Технологія турбіно будування» для студентів спеціальності 142 Енергетичне машинобудування / уклад. Ю.О. Юдін, О.В. Лапузін, В.П. Суботович. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 40с.

Укладачі: Ю.О. Юдін,
О.В. Лапузін
В.П. Суботович

Рецензент О.І. Тарасов

Кафедра турбінобудування

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Лабораторна робота 1	
Визначення торцевого биття гребеня упорного підшипника методом двох індикаторів.....	6
1.1. Опис методу вимірювання торцевого биття двома індикаторами.....	6
1.2. Опис установки.....	7
1.3. Порядок виконання лабораторної роботи.....	8
1.4. Зміст звіту.....	12
2. Лабораторна робота 2	
Контроль центрування роторів за муфтами.....	13
2.1. Опис установки.....	13
2.2. Порядок проведення роботи.....	14
2.3. Особливості центрування роторів за радіальними і осьовими штифтами.....	18
2.4. Зміст звіту.....	22
3. Лабораторна робота 3	
Контроль радіальних зазорів в проточній частині турбіни.....	24
3.1. Опис установки.....	24
3.2. Порядок проведення роботи.....	24
3.3. Метод непрямого вимірювання зазорів за допомогою перевірного вала.....	26
3.4. Зміст звіту.....	27
4. Лабораторна робота 4	
Контроль сполучення деталей методом свинцевих відбитків.....	28
4.1. Опис установки.....	28
4.2. Порядок проведення роботи.....	28
4.3. Метод контролю і сполучення за допомогою свинцевих відбитків.....	29
4.4. Зміст звіту.....	29
5. Лабораторна робота 5	

Динамічне балансування роторів методом двох пусків.....	31
5.1. Опис установки для балансування роторів.....	31
5.2. Вимірювальні прилади.....	31
5.3. Порядок проведення роботи.....	35
5.4. Метод двох пусків.....	36
5.5. Зміст звіту.....	38
5.6. Приклад результатів вимірювань і обчислень кута β і G_{yp}	39
Список літератури.....	40

ВСТУП

На завершальному етапі технологічного процесу виробництва турбін важливе значення набувають роботи, пов'язані з контролем виготовлення і складання вузлів і деталей.

Останнім і найбільш відповідальним етапом в технологічному процесі є збирання і випробування турбіни на складально-випробувальному стенді підприємства. Від якісного виконання робіт на стенді залежить надійність і економічність роботи всього турбоагрегату. Такі роботи виконуються висококваліфікованими робітниками під безпосереднім контролем інженерів-монтажників.

До комплексу лабораторних робіт увійшли основні операції, пов'язані з виконанням вимірювань індикаторами і підготовкою вказівок на додаткову обробку деталей гребеня упорного диска ротора; з контролем центрування і центруванням роторів за напівмуфтами; з контролем взаємного положення ротора і елементів статора турбіни – обойми кінцевих ущільнень та діафрагм методом непрямого вимірювання зазорів за допомогою перевірного вала; з перевіркою сполучень головних елементів підшипника ковзання – корпус і вкладиш; з виконанням динамічного балансування ротора сучасним методом двох пусків, використовуючи вимірювання амплітуди і фази вібрації.

Всі роботи проводяться на паровій турбіні і лабораторних стендах, розташованих на кафедрі турбінобудування. Виконання робіт безпосередньо на натурному об'єкті дозволяє студентам закріпити теоретичний матеріал, набути практичних навичок, а також детально ознайомитися з конструкцією турбіни.

1. Лабораторна робота № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ТОРЦЕВОГО БИТТЯ ГРЕБЕНЯ УПОРНОГО ПІДШИПНИКА МЕТОДОМ ДВОХ ІНДИКАТОРІВ

Мета роботи:

- перевірити торцеве биття гребеня упорного підшипника;
- визначити кутове положення точки максимального биття упорного гребеня;
- підготувати рекомендації з оброблення гребеня для усунення виявленого биття.

1.1. Опис методу вимірювання торцевого биття двома індикаторами

Для надійної роботи упорного підшипника турбіни торцеве биття упорного гребеня не повинно перевищувати 0,02 мм. Така жорстка вимога викликає необхідність контролю торця упорного гребеня при кожному ремонті турбіни.

Для контролю торцевого биття упорного гребеня ротор встановлюють на люнети або у власні підшипники турбіни (рис. 1.1). Визначення торцевого биття упорного гребеня здійснюють встановленням двох індикаторів, які закріплені на штативах. Ніжки індикаторів розміщують перпендикулярно до поверхні упорного гребеня. Індикатори повинні бути розміщені в одній меридіанній площині на однаковій відстані від осі вала і мати попередній натяг. Під час обертання вала індикатори будуть фіксувати сумарний вплив осьового переміщення ротора й биття упорного гребеня, тому що люнети або підшипники не запобігають осьовому переміщенню вала.

Нехай після встановлення індикаторів показання першого індикатора буде A_o , а другого – B_o . Після обертут ротора на 180° показання обох індикаторів зміняться і матимуть значення

$$A = A_o + X + Y; \quad (1)$$

$$B = B_o - X + Y, \quad (2)$$

де X – зміщення, що викликане перекосом гребеня;

Y – зміщення, що викликане осьовим переміщенням ротора.

При відніманні з рівняння (1) рівняння (2) отримуємо:

$$A - B = A_o - B_o + 2X. \quad (3)$$

Якщо на початковому етапі встановити обидва індикатори на нуль, рівняння (3) спрощується:

$$A - B = 2X; \quad (4)$$

$$X = (A - B)/2. \quad (5)$$

Таким чином, перекис X на відстані між індикаторами, дорівнює напіврізниці кінцевих показань індикатора. Отже, використання двох індикаторів дає можливість виключити вплив осьового переміщення ротора під час вимірювання торцевого биття упорного гребеня.

1.2. Опис установки

Для проведення лабораторної роботи маємо два робочих місця. Перше місце – зона упорного підшипника турбіни потужністю 1000 кВт, друге – спеціальний навчальний стенд. Для вимірювання торцевого биття упорного гребеня на турбіні і на стенді встановлені штативи для закріплення індикаторів. Індикатори закріплюють в діаметрально протилежних місцях на рівній відстані від осі обертання упорного гребеня.

Вимірювання торцевого биття здійснюється механічними індикаторами годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм (рис. 1.1). Для отримання відчутного биття торцеві поверхні гребеня навчального стенда спеціально проточені.

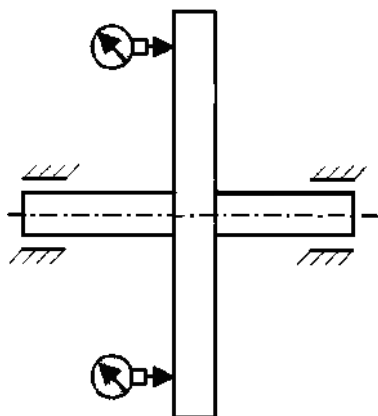


Рисунок 1.1

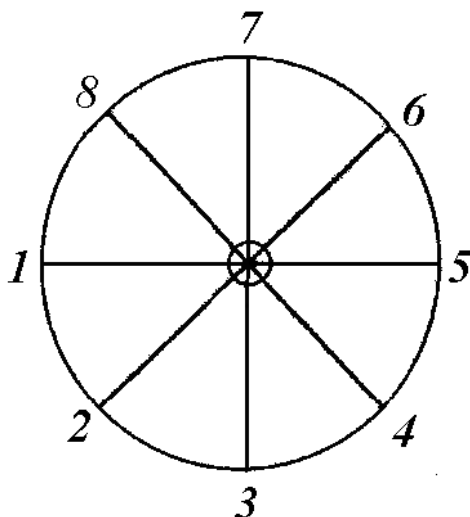


Рисунок 1.2

1.3. Порядок виконання лабораторної роботи

При виконанні вимірювань коло колеса поділяють на парну кількість рівних частин. У цій лабораторній роботі коло поділено на вісім частин (рис. 1.2), а радіуси пронумеровані. Спочатку проведення вимірювань ротор встановлюють таким чином, щоб діаметр, який відмічено точками 1–5, був розташований горизонтально. При цьому напроти точки 1 розташовують перший індикатор, а напроти точки 5 – другий. Обидва індикатори обертом шкали настроюють на нуль. Потім ротор повертають, перший ін-

дикатор суміщають з точкою 2, а другий – з точкою 6 і записують їх показання. При русі стрілки індикатора за годинниковою стрілкою показання додатні (+), а проти годинникової стрілки – від’ємні (–). Таким чином, послідовно вимірюють биття в усіх точках обома індикаторами. Результати першого вимірювання заносять до граф *в* і *є*, а другого – до граф *г* і *ж* табл. 1.1. Коли колесо зробить повний оберт, індикатори потраплять у точки 1 і 5, в яких їх було настроєно на нуль. Треба мати на увазі, що показання індикаторів при цьому можуть і не дорівнювати початковим, однак обидва індикатори повинні мати однакові показання, що відповідають осьовому зміщенню ротора за один оберт. Якщо різниця показань індикаторів перевищує 0,015 мм, то необхідно враховувати, що при вимірюваннях припущено помилку, і цю частину роботи треба повторити з настроюванням індикаторів знову на нуль.

З метою виключення випадкових помилок виконують кілька вимірювань і визначають середньоарифметичне значення.

До граф *д* і *з* таблиці 1.1 вносять середньоарифметичні значення биття у кожній точці для кожного індикатора. До графи *і* вносять різниці середньоарифметичних значень показань індикаторів для кожної точки, до графи *к* - напіврізниці цих значень *X*, які характеризують биття площини упорного гребеня.

Для визначення величини кутового положення точки максимального биття площини упорного гребеня будують графік, де по осі абсцис відкладають номери точок відліку, а по осі ординат - алгебраїчні значення биття у відповідних точках (рис. 1.3).

Графік будують в масштабі 100:1. Одержаний графік повинен мати форму правильної синусоїдальної кривої. Розбіг точок відносно правильної синусоїдальної кривої вказує на відхилення робочої поверхні упорного гребеня від правильної площини.

Таблиця 1.1

Індика- тор №1	Індика- тор №2	Показання індикаторів (ММ x 100)						Різниця середніх показників $\partial-3$	$X=\frac{i}{2}$
		Індикатор №1			Індикатор №2				
		Вимірю- вання №1	Вимірю- вання №2	$\frac{b+z}{2}$	Вимірю- вання №1	Вимірю- вання №2	$\frac{\epsilon+\text{ж}}{2}$		
номер точки	номер точки	ϵ	z	∂	ϵ	ж	3	i	κ
a	b								
1	5								
2	6								
3	7								
4	8								
5	1								
6	2								
7	3								
8	4								

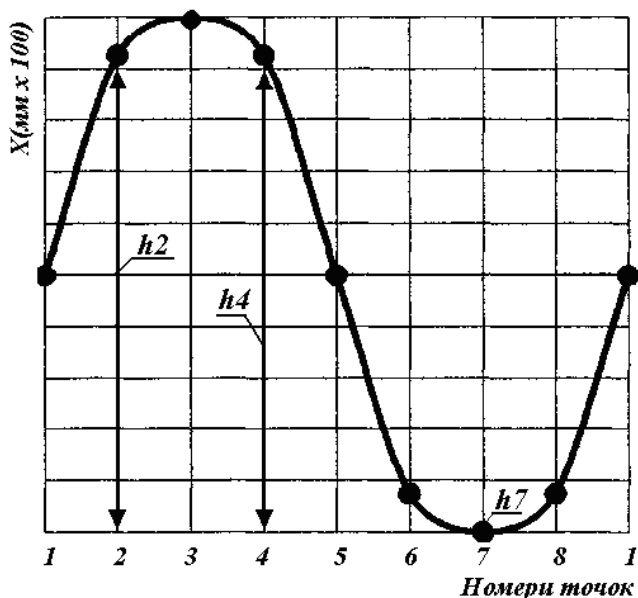
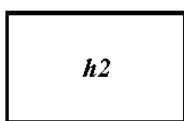


Рисунок 1.3

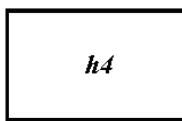
Треба мати на увазі, що максимум і мінімум биття можуть знаходитись між точками вимірювань. Це можливо визначити лише під час побудови кривої.

Для виправлення площини упорного гребеня і усунення биття вказують величину стоншення гребеня в трьох точках, які визначають площину, що перпендикулярна осі обертання. Ці величини записують до формуляра з визначенням номерів точок, де необхідно виконувати контроль індикаторами при обробці гребеня упорного підшипника.

У формуляр звіту (рис. 1.4) лабораторної роботи належить записати наступне: биття усунути обробкою гребеня і здійснити контроль індикаторами у відповідних точках відносно найнижчої точки кривої (рис.1.3):



Точка № 2



Точка № 4



Точка № 7

Рисунок 1.4

1.4. Зміст звіту

Мета роботи.

Основні положення метода вимірювань биття гребеня двома індикаторами.

Таблиця вимірювань.

Крива торцевого биття.

Вказівки щодо обробки торцевої поверхні гребеня і здійснення контролю у відповідних точках.

Контрольні запитання

1. Навіщо при вимірюванні торцевого биття використовують два індикатори?
2. Чому не можна визначити місце максимального биття за таблицею вимірювань без побудови кривої ?
3. У якому випадку побудована за точками крива не буде синусоїдальною?
4. Чому після здійснення повного оберту обидва індикатори повинні мати однакові показання? Що може бути причиною відхилення показань обох індикаторів від початкових?

2. Лабораторна робота 2

КОНТРОЛЬ ЦЕНТРУВАННЯ РОТОРІВ ЗА МУФТАМИ

Мета роботи:

- навчити студентів послідовно і правильно вимірювати зазори за допомогою набірних щупів та заповнювати формуляр центрування;
- визначити за результатами вимірювань необхідне переміщення опор для досягнення центрування роторів.

2.1. Опис установки

Установка для проведення лабораторної роботи складається з верхньої і нижньої частині корпуса турбіни потужністю 1000кВт. Контроль центрування здійснюють між калібрувальним валом і ротором турбіни. Для проведення вимірювань на калібрувальному валу і напівмуфті ротора турбіни встановлено центрувальні пристрої.

Для контролю центрування роторів за муфтами використовують два типи пристроїв з двома парами радіальних штифтів, розташованих у різних площинах, перпендикулярних осі обертання роторів (рис.2.1), і пристроїв з радіальними і осьовими штифтами, розташованими в одній площині, перпендикулярній осі обертання роторів (рис. 2.2).

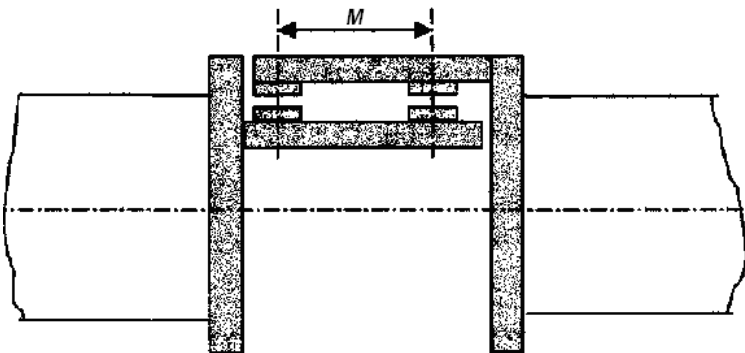


Рисунок 2.1

У цій лабораторній установці використано другий тип пристосування (див. рис. 2.2). Пристосування виконано у вигляді двох скоб, які закріплено на напівмуфтах сполучених валів. З метою поліпшення зручності проведення роботи першу пару центрувальних скоб пофарбовано у червоний колір, а другу – у чорний.

Для вимірювання зазорів між штифтами використовують два комплекти набірних щупів з пластинами товщиною від 0,03 до 0,5 мм і від 0,55 до 1 мм.

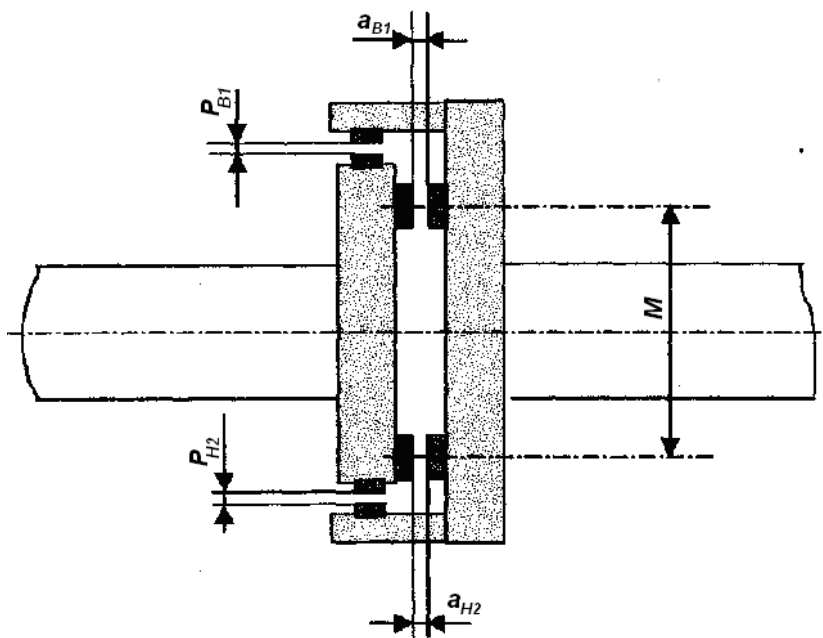


Рисунок 2.2

2.2. Порядок проведення роботи

Під час проведення лабораторної роботи ротор турбіни і калібрувальний вал обертають таким чином, щоб осі центрувальних скоб знаходи-

лись у вертикальному положенні, причому обидві перші скоби (червоні) були зверху, а другі (чорні) – знизу. У такому положенні виконують вимірювання радіальних і осьових зазорів набиранням пластин щупа. Одержані значення зазорів записують до формуляра центрування (рис. 2.3). Значення зазорів, отримані за першою парою штифтів (червоною), записують до першого формуляра (лівого), значення зазорів, отримані за другою парою штифтів (чорною), – до другого формуляра (правого).

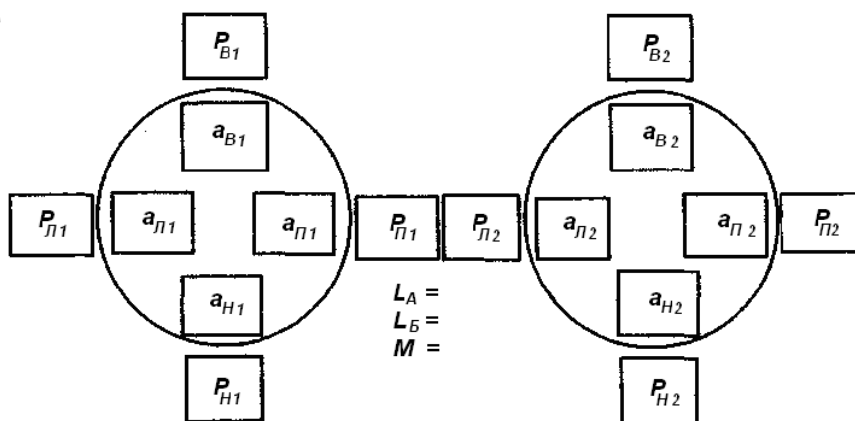


Рисунок 2.3

Для зручності під час вимірювання зазорів за осьовими штифтами калібрувальний вал зсувають в осьовому напрямку таким чином, щоб один із осьових зазорів дорівнював нулю, тоді потрібно вимірювати лише один із осьових зазорів. Після виконання вимірювань у цьому положенні заповнюють чотири клітинки формуляра: P_{B1} , a_{B1} , P_{H2} , a_{H2} .

Після виконання вимірювань у першому положенні ротор і калібрувальний вал обертають на 180° і виконують вимірювання зазорів P_{B1} , a_{B1} ,

P_{H2} , a_{B2} . Ці два вимірювання при вертикальному положенні центрувальних скоб дають можливість визначити радіальне зміщення і злам осей у вертикальній площині.

Для визначення радіального зміщення і зламу осей у горизонтальній площині центрувальні скоби встановлюють горизонтально і виконують два вимірювання: у положенні, при якому перші (червоні) штифти знаходяться зліва, а другі (чорні) – справа, і при оберті на 180° .

Дані із формуляра переносять до табл. 2.1 і розраховують X_B , X_2 , мм, та Y_B , Y , мм/м. Для виконання розрахунків за табл. 2.1 необхідно знати діаметральну відстань M (її заміряють лінійкою) між осьовими штифтами, м.

Необхідні переміщення опор для забезпечення нормального центрування визначають розрахунками за табл. 2.2, де U – сумарне переміщення опор A і B , L_A і L_B – відстань від площини обертання осьових штифтів до опор A і B (м) (рис. 2.4).

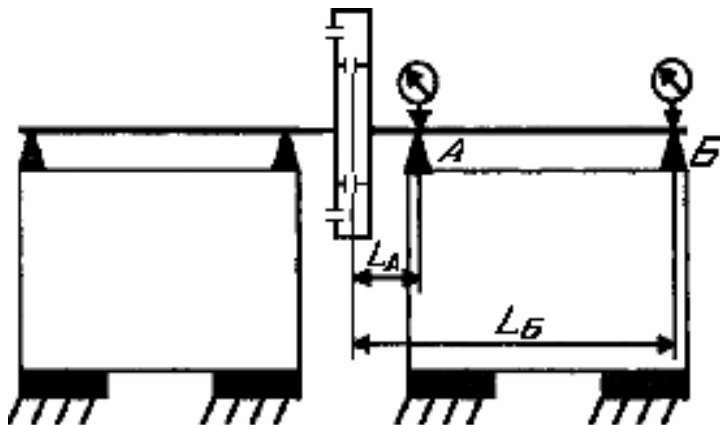


Рисунок 2.4

Таблиця 2.1

Положення осей роторів		Формула	Примітки
У вертикальній площині	Радіальне зміщення	$X_B = \frac{(P_{B1} + P_{B2}) - (P_{H1} + P_{H2})}{4}$	При позитивному значенні X_B вал турбіни нижче, ніж калібровий
	Злам осей на відстані 1 м	$Y_B = \frac{(a_{B1} + a_{B2}) - (a_{H1} + a_{H2})}{2M}$	При позитивному значенні Y_B вал турбіни повернуто проти годинникової стрілки
У горизонтальній площині	Радіальне зміщення	$X_G = \frac{(P_{Л1} + P_{Л2}) - (P_{П1} + P_{П2})}{4}$	При позитивному значенні X_G вал турбіни правіше, ніж калібровий
	Злам осей на відстані 1 м	$Y_G = \frac{(a_{Л1} + a_{Л2}) - (a_{П1} + a_{П2})}{2M}$	При позитивному значенні Y_G вал турбіни повернуто проти годинникової стрілки

Продовження табл. 2.1

Повне переміщення опор	Для опори А	Для опори Б	Примітки
У вертикальній площині	$U_{AB}=X_B + L_A Y_B$ $U_{AB}=$	$U_{BB}=X_B + L_B Y_B$ $U_{BB}=$	При позитивних значеннях U опори переміщуються уверх або вліво, при негативних – униз або вправо
У горизонтальній площині	$U_{AG}=X_G + L_A Y_G$ $U_{AG}=$	$U_{BG}=X_G + L_B Y_G$ $U_{BG}=$	

2.3. Особливості центрування роторів за радіальними і осьовими штифтами

Контроль центрування за допомогою пристрою, що наведено вище, оснований на тому, що за відсутності осьового зміщення при обертанні роторів усі точки кронштейнів описують кола, центри яких збігаються з осями обертання роторів, а площини обертання кронштейнів перпендикулярні осям роторів. Якщо при одночасному провертанні роторів зазор між радіальними штифтами не змінюється, то радіальне зміщення роторів відсутнє. Незмінність осьових зазорів при провертанні роторів свідчить про паралельність осей валів або, точніше, про паралельність дотичних до пружної лінії валів, які сполучені в площині розташування осьових штифтів, та про відсутність зламу осей.

У загальному випадку завжди можливе осьове зміщення роторів при їх провертанні, і тому зміна осьових зазорів, які заміряно за однією парою штифтів, не може свідчити про стан центрування, оскільки зміна

зазорів відображає сумарний вплив зламу осей та осьового зміщення роторів. Використання другої пари штифтів, які встановлені діаметрально протилежно, дає можливість виключити вплив осьових переміщень роторів і таким чином визначити величину перекосу на базі M , де M – діаметральна відстань між штифтами.

Треба мати на увазі, що на центрувальний пристрій можна було б другу пару радіальних штифтів не встановлювати, оскільки осьове зміщення роторів не впливає на зміну радіальних зазорів. Але друга пара радіальних штифтів підвищує точність вимірювань, тому що у розрахунках використовується середньоарифметичне значення двох вимірювань. Крім цього, друга пара радіальних штифтів дає аналогічні вимірювання.

Визначимо величину радіального зміщення у перерізі роторів, де розташовано радіальні штифти, і злам осі валопроводу на одному метрі довжини ротора.

Для розрахунків введемо такі позначення:

X_B – радіальне зміщення у вертикальній площині;

X_H – радіальне зміщення в горизонтальній площині;

Y_B – злам осей у вертикальній площині;

Y_H – злам осей у горизонтальній площині;

P – зазори за радіальними штифтами;

a – зазори за осьовими штифтами.

Індексми "В", "Н", "П", "Л" позначено відповідно верхній, нижній, правий і лівий зазори, а цифрами 1 і 2 – вимірювання першим і другим пристосуваннями.

Вимірювання першим і другим пристосуваннями при вертикальному положенні радіальних штифтів дає радіальне зміщення роторів у вертикальній площині:

$$X_{1B} = \frac{P_{B1} - P_{H2}}{2} \quad i \quad X_{2B} = \frac{P_{B2} - P_{H2}}{2}$$

Середньоарифметичне зміщення двох вимірювань становить:

$$X_B = \frac{X_{1B} + X_{2B}}{2} = \frac{(P_{B1} + P_{B2}) - (P_{H1} + P_{H2})}{4}.$$

Вимірювання виконуються при повертанні обох роторів на 180° таким чином, щоб відповідні пари штифтів знаходились увесь час одна проти одної. Щоб не переплутати між собою пари штифтів, у нашій установці перше пристосування пофарбовано у червоний колір, а друге – у чорний.

Якщо пересунути обидві опори на величину X_B , то за відсутності зламу осі збігаються, за наявності зламу вони перетнуться у площині, що проходить через радіальні штифти.

Спрямування переміщення вгору або вниз визначається тим, на якому з роторів закріплено кронштейн, що охоплює, а на якому роторі закріплено кронштейн, який охоплено.

Злам осей повинно бути визначено за двома парами осьових штифтів, щоб виключити вплив осьового переміщення роторів під час повертання. Припустімо, що осі роторів перетинаються таким чином, що розкриття фланців у з'єднувальній муфті знаходяться зверху. Тоді у такому розташуванні осьові зазори між верхніми та нижніми штифтами становлять відповідно a_{B1} a_{H1} . При повертанні роторів на 180° ці зазори зміняться і будуть:

$$\begin{aligned} a_{H1} &= a_{B1} + Y + Z; & a_{B1} &= a_{H1} + Y + Z; \\ a_{B2} &= a_{H2} - Y + Z; & a_{H2} &= a_{B2} - Y + Z. \end{aligned}$$

де Y – зміна зазору внаслідок перекосу напівмуфт;

Z – осьове зміщення роторів при повертанні.

При відніманні другого рівняння від першого отримаємо перекик на діаметрі розташування осьових штифтів:

$$Y = \frac{(a_{B1} + a_{B2}) - (a_{H1} + a_{H2})}{2}.$$

Злам осей на довжині одного метра Y_B отримаємо діленням переко-
су на відстань між осьовими штифтами M , м.

$$Y_B = Y/M$$

або

$$Y_B = \frac{(a_{B1} + a_{B2}) - (a_{H1} + a_{H2})}{2M}.$$

Таким чином, використання двох пар осьових штифтів дає можли-
вість виключити вплив осьового зміщення роторів і отримати злам осей у
чистому вигляді.

Для усунення вертикального зламу осей необхідно розвернути ма-
шину, яка центрується у вертикальній площині, таким чином, щоб не по-
рушити радіальне центрування, яке встановлене раніше. Розворот повинен
бути здійснений навколо центра, розташованого в площині обертання раді-
альних штифтів. Величина переміщення лап машин (див. рис. 2.4) визнача-
ється такими співвідношеннями:

• для лапи A

$$Y_{AB} = Y_B L_A = \frac{(a_{B1} + a_{B2}) - (a_{H1} + a_{H2})}{2M} L_A;$$

• для лапи B

$$Y_{BB} = Y_B L_B = \frac{(a_{B1} + a_{B2}) - (a_{H1} + a_{H2})}{2M} L_B,$$

де L_A , L_B – відстань, яка виміряна по горизонталі від площини обертання
осьових штифтів до відповідної опори у метрах.

Сумарне переміщення лап для одночасного усунення радіального
зміщення роторів і зламу U_{AB} U_{BB} може бути визначено із співвідношення:

• для лапи A

$$U_{AB} = X_B + Y_{AB} = X_B + Y_B L_A ;$$

• для лапи Б

$$U_{BB} = X_B + Y_{BB} = X_B + Y_B L_B .$$

Напрямок переміщення обох лап машини для усунення цього зламу осі, а саме розкриття фланців муфти зверху, повинен бути направлений вгору. Отримані співвідношення можуть бути використані при виправленні центрування в горизонтальній площині, якщо індекс "в" буде замінено індексом "л", а "н" – індексом "п".

Контролем надійності виконаних вимірювань радіальних зазорів є співпадіння сумарних зазорів при різних розташуваннях роторів:

$$P_{B1} + P_{H2} = P_{B2} + P_{H1} = P_{Л1} + P_{Л2} = P_{Л2} + P_{Л1} .$$

Це співвідношення повинне витримуватися з точністю до 0,02 мм. Підсумком лабораторної роботи є переміщення опори калібрувального вала за результатами розрахунків з контролем за індикаторами (див. рис.2.4) і повторні вимірювання радіальних і осьових зазорів між штифтами центрувальних скоб.

2.4. Зміст звіту

Після проведення лабораторної роботи складається звіт, у якому наводяться:

- короткий зміст лабораторної роботи;
- формуляр центрування;
- рис. 2.2 і 2.4 і розрахунки за табл. 2.1 та 2.2;
- необхідне переміщення опор для досягнення центрування;
- результат повторних вимірювань зазорів після виконання переміщень опор калібрувального вала.

Контрольні запитання

1. Чи можна вимірювати радіальне зміщення одною парою радіальних штифтів?
2. Чому не можна вимірювати злам осей за однією парою осьових штифтів?
3. Яким чином впливає на точність визначення переміщень опор діаметральна відстань між осьовими штифтами M ?

3. Лабораторна робота 3

КОНТРОЛЬ РАДІАЛЬНИХ ЗАЗОРІВ У ПРОТОЧНІЙ ЧАСТИНІ ТУРБІНИ

Мета роботи:

- навчити студентів користуватися перевірним валом;
- визначити зазори у проточній частині турбіни за допомогою набірних щупів і перевірного вала;
- розрахувати реальні зазори по кінцевих та діафрагменних ущільненнях за результатами вимірювань.

3.1. Опис установки

Лабораторна установка виконана на базі турбіни потужністю 1000 кВт. Для проведення вимірювань зазорів використовується перевірочний вал (рис. 3.1), шийки якого за діаметром відповідають шийкам ротора турбіни. На трубці перевірного вала розташований хомутик з пальцем-штихмасом, який може висуватися і змінювати радіус обертання.

Зазори *A*, *B*, *C* вимірюються за допомогою пластин набірного щупа.

3.2. Порядок проведення роботи

Під час виконання лабораторної роботи в проточну частину турбіни укладають перевірний вал з хомутиком і штихмасом. Пересуваючи штихмас у державці хомутика, встановлюють зазор між штихмасом і вусиком лабіринтового ущільнення – від 0,5 до 1 мм.

Повертаючи перевірний вал з хомутиком в три взаємно перпендикулярні положення, вимірюють зазор між торцем штихмаса і вусиком ущільнення за допомогою набірних щупів (рис. 3.2).

Потім звільняють хомутик і пересувають його в осьовому напрямі уздовж перевірного вала до перерізу 2, де знаходиться ущільнення першої діафрагми, і повторюють вимірювання зазорів *A*, *B* і *C*. Пересуваючи хомутик уздовж перевірного вала, проводять вимірювання зазорів решти перері-

зів. У перерізах 1 і 7 визначають зазори по кінцевих ущільненнях, у перерізах 2 і 6 визначають зазори по діафрагменних ущільненнях. Дані вимірювань записують в табл. 3.1.

Оскільки під час проведення роботи немає можливості укласти ротор у проточну частину, то зазор між ротором і вусиком ущільнення в горизонтальному роз'ємі задається в табл. 3.1. Зазори v , c і δ обчислюють за допомогою рівняння

$$v = a - (A - B), c = a - (A - C), \delta = a + c - v$$

Таблиця 3.1

Номер перерізу	A	B	C	a	v	c	δ
1				0,35			
2				0,6			
3				0,6			
4				0,6			
5				0,6			
6				0,6			
7				0,35			

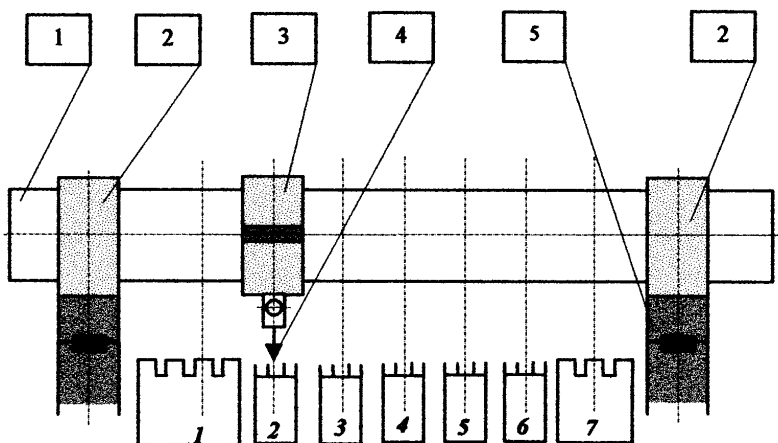


Рисунок 3.1

- | | | | | | |
|----------|-------------------|----------|-------------|----------|----------|
| 1 | перевірочний вал, | 2 | підшипники, | 3 | хомутик, |
| 4 | штихмас, | 5 | опора | | |

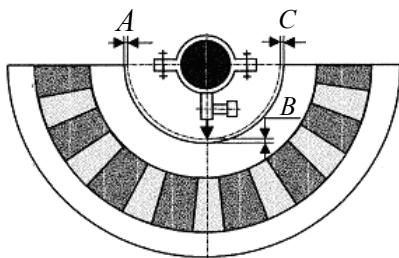


Рисунок 3.2

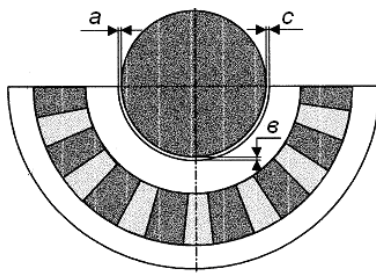


Рисунок 3.3

3.3. Метод непрямого вимірювання зазорів за допомогою перевірного вала

Метод, який використовується у цій лабораторній роботі, заснований на вимірюванні відносних зазорів за допомогою перевірного вала і розрахунку фактичних верхніх і нижніх зазорів між ротором і вусиками сег-

ментів ущільнень. Уклавши ротор в проточну частину на нижні половини вкладишів, можна виконати вимірювання зазорів у горизонтальному роз'ємі. Після знімання ротора укладають перевірний вал, шийки якого мають діаметри, відповідні шийкам ротора. Оскільки їх осі збігаються, тому і штихмас, що укріплений на хомутику перевірного вала, буде описувати кола, концентричні втулкам ущільнень на валу.

Якщо при горизонтальному положенні штихмаса встановити між штихмасом і вусиками ущільнення довільний зазор A , то при повороті штихмаса в нижнє положення (див. рис. 3.2) зазор змінюється і набуває значення B , а при повороті в горизонтальне положення – зазор зі значенням C .

Дійсні зазори по ущільненнях ротора мають значення a, b, c . Неважко показати, що якщо діаметри шийок перевірного вала і ротора точно однакові, то має місце таке рівняння:

$$A - B = a - b; \quad A - C = a - c.$$

$$\text{Звідси} \quad b = a - (A - B); \quad c = a - (A - C).$$

Таким чином, знаючи один із дійсних зазорів між ротором і роз'ємом, можна розрахунковим шляхом одержати нижній і верхній зазори. Значення верхнього зазору d одержимо із співвідношення: $d = a - b + c$ за умови, що розточування по вусах втулки ущільнення має форму правильного кола.

3.4. Зміст звіту

Після проведення роботи складають звіт, в якому наводять схему вимірювань, розрахункові формули, таблицю з результатами вимірювань і розрахунків.

Контрольні запитання

1. Чому для контролю радіальних зазорів в проточній частині турбіни застосовують непрямі методи вимірювань?
2. Які вимоги ставляться до перевірного вала?
3. Назвіть орієнтовні величини зазорів по кінцевих і діафрагменних ущільненнях.

4. Лабораторна робота 4

КОНТРОЛЬ СПОЛУЧЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ СВИНЦЕВИХ ВІДБИТКІВ

Мета роботи:

- виконати послідовність операцій, пов'язаних з вимірюванням свинцевих відбитків;
- визначити сполучення кришки і вкладиша підшипника за допомогою свинцевих відбитків.

4.1. Опис установки

Лабораторна робота проводиться на другому підшипнику турбіни потужністю 1000 кВт. Кришка підшипника закріплена двома шпильками і має масу близько 10 кг, для демонтажу на ній встановлений римболт.

Для вимірювання зазорів використовується свинцевий дротик діаметром ~ 1 мм, товщина відбитків вимірюється мікрометричною скобою 0–25 мм з ціною поділки 0,01 мм.

4.2. Порядок проведення роботи

Починаючи лабораторну роботу, перевіряємо натяг по кришці другого підшипника турбіни на стенді. Кришку підшипника знімають за допомогою спеціального стрижня, пропущеного в отвір римболта, і укладають на дерев'яні колодки, що розташовані на роз'ємі турбіни. Потім на горизонтальний роз'єм корпусу підшипника укладають по два свинцевих дротики з кожного боку. У верхній частині на вкладиш укладають також два свинцевих дротики по обидва боки отвору під термометр. Місця укладання дротиків мажуть солідолом, кришку накривають і притягають двома гайками. Після зняття кришки товщину свинцевих відбитків заміряють мікрометричною скобою і обчислюють натяг.

4.3. Метод контролю і сполучення за допомогою свинцевих відбитків

Цей метод заснований на тому, що деформація свинцевих дротиків, укладених на роз'єм кришки підшипника, і на верхню точку вкладиша, з великою точністю відображає дійсне сполучення Δ (зазор або натяг) по кришці підшипника.

Дійсно, після легкого обтягування кріплення кришки підшипника (рис. 4.1) дротики деформуються, і, замірявши їх товщину мікрометричною скобою, можна визначити характер сполучення між кришкою і вкладишем:

$$\Delta = c - (a + e)/2$$

Якщо $\Delta > 0$ має місце зазор, тобто $c > (a + e)/2$, якщо $\Delta < 0$ має місце натяг, $c < (a + e)/2$.

Для надійної роботи підшипника необхідно забезпечити деякий натяг (0 – 0,04 мм). За наявності зазору вкладиш розбиває посадочне місце і з'являється витік масла між вкладишем і кришкою. Збільшений натяг призводить до витіку масла по роз'єму кришки підшипника.

Якщо при збірці між вкладишем і кришкою підшипника утворився зазор, то для отримання бажаного натягу шабрують горизонтальний роз'єм кришки підшипника. Для зменшення натягу шабрують роз'єм вкладиша.

4.4. Зміст звіту

Після проведення роботи складають звіт, в якому наводять схему вимірювань, указують товщину свинцевих відбитків і обчислюють фактичне сполучення (натяг, зазор) кришки і вкладиша (табл. 4.1). Якщо сполучення не відповідає вимогам (натяг 0 – 0,04 мм), то вказують заходи щодо доведення сполучення до норми.

Контрольні запитання

1. Чому в сполученні кришки і вкладиша потрібен натяг?
2. Як слюсарним шляхом можна збільшити або зменшити натяг між вкладишем і кришкою підшипника?

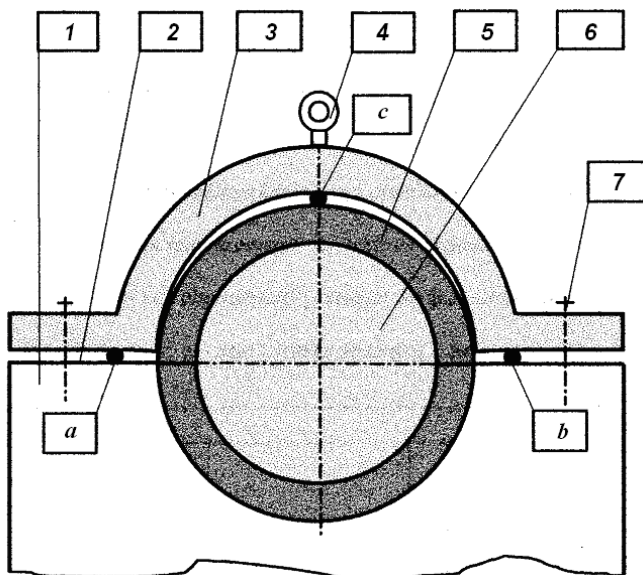


Рисунок 4.1

- 1 корпус підшипника; 2 роз'єм; 3 кришка підшипника;
 4 римболт; 5 вкладиш; 6 ротор; 7 шпільки;
 a, b, c свинцевий дріт діаметром ~ 1 мм

Таблиця 4.1 Приклад визначення сполучення: натяг або зазор

a_1	a_2	$a = (a_1 + a_2)/2$
0,47мм	0,45мм	0,46мм
e_1	e_2	$e = (e_1 + e_2)/2$
0,48 мм	0,46 мм	0,47 мм
c_1	c_2	$c = (c_1 + c_2)/2$
0,46 мм	0,45 мм	0,455 мм
$\Delta = c - (a + e)/2 = -0,01$. Таким чином, має місце допустимий натяг		

5. Лабораторна робота 5

ДИНАМІЧНЕ БАЛАНСУВАННЯ РОТОРІВ МЕТОДОМ ДВОХ ПУСКІВ

Мета роботи:

- визначити амплітуду і фазу вібрації ротора за допомогою приладу для балансування;
- розрахувати кут установки і масу вантажу, що врівноважує;
- виконати балансування ротора.

5.1. Опис установки для балансування роторів

На станині 10 установки балансування (рис. 5.1) жорстко закріплений електродвигун 1 змінного струму і опора датчика кута 15, а опори підшипників 8 закріплені з використанням гумових прокладок 9. Ротор установки балансування складається з вала 2 і двох дисків – малого 3 і великого 4, що насаджені на вал з підігрівом. Ротор опирається на сферичні кульові підшипники, які встановлені в опори підшипників 8. Передача моменту від крутильного електродвигуна 1 ротору здійснюється за допомогою проміжного вала 6 і гумових муфт 7 промвала. Датчик кута 13 розташований з боку, протилежному електродвигуну 1, і сполучений з ротором за допомогою гумової муфти 14 датчика кута 13. Амплітуду вібрації визначають віброперетворювачем 11, а фазу вібрації – датчиком кута 13, які передають електричний сигнал на блок вимірювальний 12. Для забезпечення безпеки під час проведення лабораторних робіт елементи, що обертаються, закриті захисним кожухом 16. Диск малий 3 і великий 4 мають по 24 отвори з різьбленням М8, виконаним через 15°, для установлення вантажів балансувань.

5.2. Вимірювальні прилади

При виконанні цієї лабораторної роботи використовуються два прилади: віброметр ЕВМ-БП2 або індикатор-балансувальник роторів ІБР-02.

5.2.1. Віброметр ЕВМ-БП2 призначений для вимірювання амплітуди віброзміщування в горизонтальній площині і фази невірноваженості частин обертових машин при їх балансуванні на балансувальному верстаті або на місці установлення. За умов експлуатації прилад відповідає вимогам ГОСТ 9763-67. Прилад працює без стороннього джерела живлення.

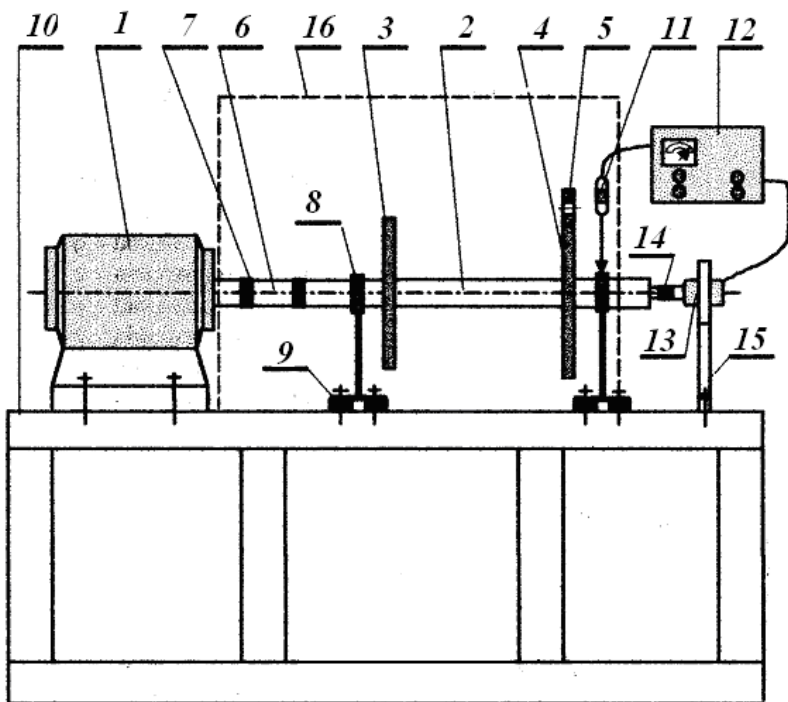


Рисунок 5.1

1 – електродвигун; 2 – вал; 3 – диск малий; 4 – диск великий; 5 – отвір М8; 6 – вал проміжний; 7 – гумові муфти проміжного валу; 8 – опори

підшипників; **9** – гумові прокладки; **10** – станина; **11** – віброперетворювач; **12** – прилад; **13** – датчик кута; **14** – гумова муфта датчика кута; **15** – опора датчика кута; **16** – захисний кожух

Технічні характеристики ЕМВ-БП2

Діапазон вимірювання амплітуди, мкм	20 – 500
Робочий діапазон частот, Гц	10 – 100
Частотний діапазон визначення кутового положення невірноваженості, Гц	10 – 65
Граничне значення вимірювальних діапазонів, мкм	100, 300, 500
Приведена похибка вимірювання віброзміщення не перевищує, %	± 10
Похибка визначення кутового положення невірноваженості не перевищує, град	± 5
Вірогідність безвідмовної роботи протягом 1000 год.	0,96

До складу віброметра ЕМВ-БП2 входять такі блоки: віброперетворювач, датчик кута, блок вимірювальний.

Індукційний перетворювач призначений для перетворення механічних коливань в електричні сигнали, що пропорційні віброшвидкості.

При переміщенні під впливом вібрації постійного магніту в котушці, нерухомо закріплений в корпусі віброперетворювача, виникає ЕРС, яка пропорційна віброшвидкості. Віброперетворювач з'єднується з вимірювальним блоком спеціальним кабелем. ЕРС, що розвивається віброперетворювачем, відхиляє стрілку приладу, тому прилад працює без стороннього джерела живлення. На вібруючий об'єкт закріплюють датчик або здійснюють контакт за допомогою щупа.

За датчик кута при вимірюванні фази коливань використовують контактний пристрій (механічний переривник).

Блок вимірювальний забезпечує вимірювання амплітуди віброзміщення, кутового положення фази неврівноваженості без прив'язки до нуля обертового ротора. При вимірюванні амплітуди віброзміщення сигнал з віброперетворювача передається на інтегруючий пристрій, де він перетворюється з напруги, пропорційної віброшвидкості, в напругу, пропорційну віброзміщенню. Далі сигнал випрямляється, фільтрується і вимірюється приладом, шкала якого градуйована в мікронах.

При вимірюванні кутового положення фази неврівноваженості напруга з віброперетворювача передається на вимірювальний прилад через контактний пристрій датчика кута.

5.2.2. Індикатор-балансувальник роторів ІБР-02 [5] призначений для контролю вібрації обертових машин, динамічного балансування роторів, в тому числі у власних підшипниках, і забезпечує:

- 1) оцінку інтенсивності вібрації машини;
- 2) визначення частоти обертання ротора, віброшвидкостей на частоті обертання ротора і їх фазових кутів;
- 3) автоматичний розрахунок корегувальних мас і кутів корекції.

Принцип роботи індикатора:

1) При контролі інтенсивності вібрації вимірюється віброшвидкість (середньоквадратичне значення (СКЗ)) у діапазоні 5–1000 Гц.

2) При балансуванні ротора визначаються частота, віброшвидкість (СКЗ) на частоті обертання ротора і їх фазові кути (за допомогою променя вбудованого стробоскопа, синхронізованого з вібросигналом) при пробних пусках, і з їх допомогою автоматично розраховуються корегувальні маси і кути корекції.

Підготовка індикатора до роботи

Перед роботою індикатора у приміщенні з плюсовою температурою повітря при необхідності (якщо він знаходився до цього на холоді) витриму-

вати його при вказаній температурі не менш 2 годин щоб не з'явився конденсат.

Провести зовнішній огляд індикатора:

- перевірити комплектність згідно з комплектом поставки;
- переконатися у відсутності зовнішніх пошкоджень корпусу и кабелю датчика вібрації.

Перевірити живлення індикатора:

Включити індикатор натискуванням кнопки «Питание». При цьому на дисплеї повинні з'явитися надписи «Тест» і після автоматичного налаштування (через 3 с) – надпис «Вибрация». Якщо при включенні індикатора на дисплеї установиться рекомендація «Зарядите батарею», то необхідно виконати зарядження акумуляторів. Для цього:

- 1) виключити індикатор натиском кнопки «Питание»;
- 2) приєднати блок живлення до індикатора;
- 3) включити блок живлення у мережу змінного струму напругою 220 В з частотою 50 Гц. При цьому на корпусі блока живлення повинні загорітися світлодіоди «Сеть» и «Заряд». Свідченням закінчення заряду акумуляторів є виключення світлодіода «Заряд»;
- 4) від'єднати блок живлення від індикатора і від мережі.

Примітка

1. При роботі індикатора від блока живлення заряд акумуляторів здійснюється автоматично.

2. При контролі інтенсивності вібрації до 1 мм/с рекомендується використовувати тільки внутрішнє джерело живлення (акумулятори), тому що у випадку використання зовнішнього блоку живлення можливі викривлення сигналу.

Включити індикатор натисненням кнопки «Питание».

5.3. Порядок проведення роботи з віброметром ЕВМ-БП2

1. Визначити амплітуди коливань за допомогою віброперетворювача в необхідному діапазоні амплітуд у горизонтальній площині.

2. Віброперетворювач укріпити в горизонтальному положенні на віброуючій поверхні підшипника поблизу сторони ротора, де виконують балансування. Приєднати до вала ротора датчик кута.

3. При вимірюванні амплітуди коливань перемикач “Рід роботи” перевести в положення “Амплітуда”, а перемикачем “Межі вимірювання” вибрати необхідну межу вимірювання, починаючи з великих амплітуд.

4. Визначення кутового положення неврівноваженості ротора виконати при заданій кількості обертів за два пуски.

5. Включити двигун, заміряти амплітуду вібрації a_1 . Перемикач “Рід роботи” встановити в положення “Фаза”. Обертаючи ручку датчика кута за годинниковою стрілкою, досягти максимального показання приладу 12. Потім, продовжуючи обертати ручку, досягти показання приладу 12, рівного нулю. Показання шкали датчика 13 будуть початковою координатою кута φ_1 . Зупинити двигун.

6. Встановити пробний вантаж в отвір на ободі диска, надійно закріпивши його.

7. Виконати другий пуск ротора з вимірюванням амплітуди коливання a_2 і координати кута φ_2 відповідно до п.п. 3 і 5. Визначити кут α між фазою коливань від власного небалансу φ_1 і фазою коливань, яка викликана сумарною дією власного небалансу і пробного вантажу φ_2 ($\alpha = |\varphi_2 - \varphi_1|$).

8. Виконати обчислення кута β і $G_{вр}$.

9. Встановити врівноважувальний вантаж на диск. Кут β відраховують від місця установки пробного вантажу проти годинникової стрілки.

10. Виконати контрольний пуск ротора. Якщо ротор виявиться неврівноваженим, то вантаж, що врівноважує, перемістити в нове місце, відраховуючи кут β за годинниковою стрілкою.

11. Виконати контрольний пуск.

5.4. Метод двох пусків

Цей метод може бути застосований при балансуванні на верстаті балансування на електростанції у власних підшипниках, а також в розгінно-балансирувальній установці.

Усі методи балансування базуються на таких теоретичних передумовках: при постійному числі обертів амплітуда коливання підшипників пропорційна силі від небалансу, а кут між вектором сили від небалансу і фазою коливання залишається постійним і не залежить від амплітуди коливань. Таким чином, всі вимірювання при пусках необхідно виконувати при незмінному числі обертів. При балансуванні однієї зі сторін ротора задача зводиться до визначення маси і місця установки вантажу балансування.

Основна задача при роботі на установці полягає у визначенні амплітуди коливання підшипників і кутів фази коливання ротора при двох пусках. Перший пуск здійснюється без встановлення яких-небудь вантажів балансування, і тому амплітуда і фаза коливань викликані власним небалансом ротора. Другий пуск здійснюється зі встановленим пробним вантажем. У цьому випадку амплітуда і фаза коливань обумовлені сумарною дією власного небалансу ротора і пробного вантажу.

Результати вимірювань амплітуд і фаз коливань двох пусків дають можливість визначити масу і місце встановлення вантажу балансування.

Розглянемо схему розташування мас власного небалансу і пробного вантажу, а також векторів вібрації (рис. 5.2). При першому пуску було встановлено напрям вектора фази коливання φ_1 – положення A і амплітуду коливання – вектор a_1 . Після установки пробного вантажу вектор перемістився в положення B (фаза коливань – φ_2), а амплітуда коливань набула значення a_2 . Параметри коливань, що одержані при другому пуску, відповідають вібрації, яка викликана сумарною дією власного небалансу ротора і пробного вантажу.



38

$$\alpha = | \varphi_2 - \varphi_1 |$$

$$a_3 = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 - 2 a_1 a_2 \cos \alpha}$$

$$\sin \beta = \frac{a_2 \cdot \sin \alpha}{a_3}$$

Маса врівноважу вального вантажу знаходиться із співвідношення

$$G_{\text{вр}} = G_{\text{пр}} \frac{a_1}{a_3} = \frac{G_{\text{пр}} \cdot a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 - 2 a_1 a_2 \cos \alpha}}.$$

Таким чином, для визначення маси і місця установки вантажу для балансування ротора достатньо знати амплітуди коливань підшипників і кут α між фазами коливань у двох пусках.

5.5. Зміст звіту

- 1) схема установки;
- 2) технічні характеристики приладу балансування;
- 3) результати вимірювань при двох пусках (див. табл. 5.1);
- 4) формули і розрахунки кута установки і маси врівноважувального вантажу;
- 5) векторну діаграму за даними вимірювань;
- 6) зіставлення даних, які одержані графічним і аналітичним шляхом.

5.6. Приклад результатів вимірювань і обчислень кута β і $G_{\text{вр}}$:

Таблиця 5.1

Номер пуску	1-й	2-й
Амплітуда	$a_1 = 110 \text{ мкм}$	$a_2 = 72 \text{ мкм}$
Фаза коливань	$\varphi_1 = 44^\circ$	$\varphi_2 = 61^\circ$
Вага пробного вантажу	—	$G_{\text{пр}} = 3,5 \text{ г}$

$$\alpha = | \varphi_2 - \varphi_1 | = 61^\circ - 44^\circ = 17^\circ ;$$

$$\sin \beta = \frac{72 \cdot \sin 17}{\sqrt{110^2 + 72^2 - 2 \cdot 110 \cdot 72 \cos 17}} = 0,455; \beta \approx 27^\circ ;$$

$$G_{\text{вр}} = 3,5 \frac{110}{\sqrt{110^2 + 72^2 - 2 \cdot 110 \cdot 72 \cos 17}} = 8,33 \text{г}$$

Контрольні запитання

1. Які основні теоретичні передумови використані в методі двох пусків для динамічного балансування ротора?
2. Чому вимірювання при обох пусках потрібно виробляти при одному і тому ж числі обертів?
3. Чим викликана вібрація, що відповідна вектору a_3 (див. рис. 5.2).
4. Чим викликана вібрація, що відповідна вектору a_2 (див. рис. 5.2).

Список літератури

1. Бауман Н.Я. Технология производства паровых и газовых турбин / Н.Я. Бауман, М.И. Яковлев, И.Н. Свечков. – Москва: Машиностроение, 1973. – 464 с.
2. Березкин В.В. Технологическая подготовка производства турбин / В.В. Березкин, С.Ю. Михаэль. – Ленинград: Машиностроение, 1985. – 254 с.
3. Справочник монтажника тепловых и атомных электростанций/ Под ред. В.П. Банника и Д.Я. Винницкого. – 2-е изд. Перераб. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 880 с.
4. Липсман С.И. Предупреждение и устранение вибрации роторных машин / С.И. Липсман, А.Т. Музыка, В.С. Липсман. – Київ: Техніка, 1968. – 196 с.
5. Руководство по эксплуатации ИБР-02.00.000 РЭ. Индикатор-балансировщик роторов вращающихся машин ИБР-02. Електронна версія: IBR-02.pdf.

Навчальне видання

Методичні вказівки
до лабораторних робіт
з курсу “Технологія турбінобудування”
для студентів спеціальності 142 Енергетичне машинобудування

Укладачі: ЮДІН Юрій Олексійович
ЛАПУЗІН Олександр Вікторович
СУБОТОВИЧ Валерій Петрович

Відповідальний за випуск проф. Усатий О.П.
Роботу до друку рекомендував проф. Ромашов Ю.В.

Редактор М.П. Єфремова

План 2020 р., поз. 87 _____

Підписано до друку _____. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,4.

Наклад 50 прим. Зам. № _____ Ціна договірна

Видавничий центр НТУ “ХП”.

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №5478 від 21.08.2020 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Самостійне електронне видання